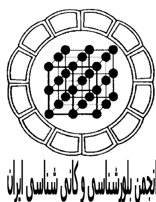
مجله
بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی‌ام، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۱۱۹ تا ۱۲۸



[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.9.3]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.119]

شیمی کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی در کانسار باریت (طلا- نقره) چشمه نقره، زیر پهنه سبزوار، شمال غرب کاشمر

اسماعیل غفوری سدهی، حسینعلی تاج‌الدین*، ابراهیم راستاد، پوریا محمودی

گروه زمین شناسی اقتصادی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۶، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۵/۳۰)

چکیده: کانسار باریت (طلا-نقره) چشمه نقره در ۲۰ کیلومتری شمال غرب کاشمر، در زیرپهنه سبزوار واقع است. واحدهای سنگی منطقه کانسار از یک توالی از واحدهای آتش‌فشانی- رسوبی ائوسن شامل توف سنگی، توف ریولیتی، شیل توفی، لاپیلی توف و آگلومرا همراه با گدازه‌های با ترکیب پیروکسن آندزیت و تراکی آندزیت تشکیل شده‌اند. در این کانسار، باریت به‌صورت عدسی، توده‌ای، نواری و رگه- رگچه‌ای در واحد توف ریولیتی شکل گرفته است. باریت‌های عدسی- توده‌ای و نواری‌شکل دربردارنده کانه‌های فلزی شامل پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، تترائدریت، آرژانتیت و الکتروم هستند. همراهی کانی‌های سولفیدی با باریت نشان‌دهنده شرایط زیراکسیدی در زمان نهشت کانسنگ است. در این پژوهش، شیمی کانی‌های سولفیدی موجود در کانسنگ‌های عدسی شکل باریتی با ریزپردازشگر الکترونی (EPMA) بررسی شد. بر این اساس، گستره باریک و مقدار پایین آهن درون اسفالریت با کانه‌زایی در یک محیط زیراکسیدی همخوانی دارد. حضور عناصر سنگین چون طلا و نقره درون پیریت نشان می‌دهد که پیریت‌ها در یک محیط زیراکسیدی تشکیل شده و آرسنیک موجود درون پیریت به‌صورت یون فلزی (As^{3+}) جانشین آهن شده است. حضور مقادیر فراوان آنتیمون، بیسموت، آرسنیک و نقره در همه کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی کانسار چشمه نقره نشان می‌دهد که سیال فلزدار سازنده کانسار چشمه نقره غنی از این عناصر فلزی بوده است.

واژه‌های کلیدی: *کانسار چشمه نقره؛ باریت؛ سولفید توده‌ای غنی از طلا؛ شیمی کانی.*

مقدمه

پهنه‌های ساختاری البرز مرکزی، ایران مرکزی و شمال غرب پهنه سنندج-سیرجان مهم‌ترین میزبان های ذخایر باریت در ایران هستند [۱-۳]. بسیاری از باریت‌های شمال غرب پهنه سنندج-سیرجان چون کانسارهای باریکا [۴-۶]، شکر بیگ [۷] و عبدالصمدی [۹،۸]، ماهیت چینه‌سان دارند. عمده این کانسارها در واحدهای آتش فشانی-رسوبی تشکیل‌شده‌اند و از نوع کانسارهای سولفید توده‌ای (VMS) زیرگروه کوروکو هستند [۴-۹].

افزون بر پهنه سنندج- سیرجان، کانه‌زایی باریت چینه‌سان در سنگ‌های آتش‌فشانی- رسوبی زیرپهنه سبزوار نیز رخ داده است (شکل‌های ۱ الف و ب). کانسار چشمه نقره در ۲۰ کیلومتری شمال غرب کاشمر، یک کانسار باریت چینه‌سان غنی از طلا (و نقره) است که در واحدهای آتش‌فشانی- رسوبی ائوسن شکل گرفته و پیشتر توسط برخی از پژوهشگران بررسی شده است. از آنجا که کمربند نئوتتیس میزبان ذخایر عظیمی از طلای اپی‌ترمال است و زیرپهنه سبزوار بخشی از کمربند نئوتتیس به شمار می‌آید [۱۰]، بر اساس شواهد زمین‌شناسی و کانی‌سازی [۱۲،۱۱]، این کانسار در اثر نهشت سیال‌های گرمابی برونده‌می در کف دریا نهشته شده و از نوع ذخایر طلای

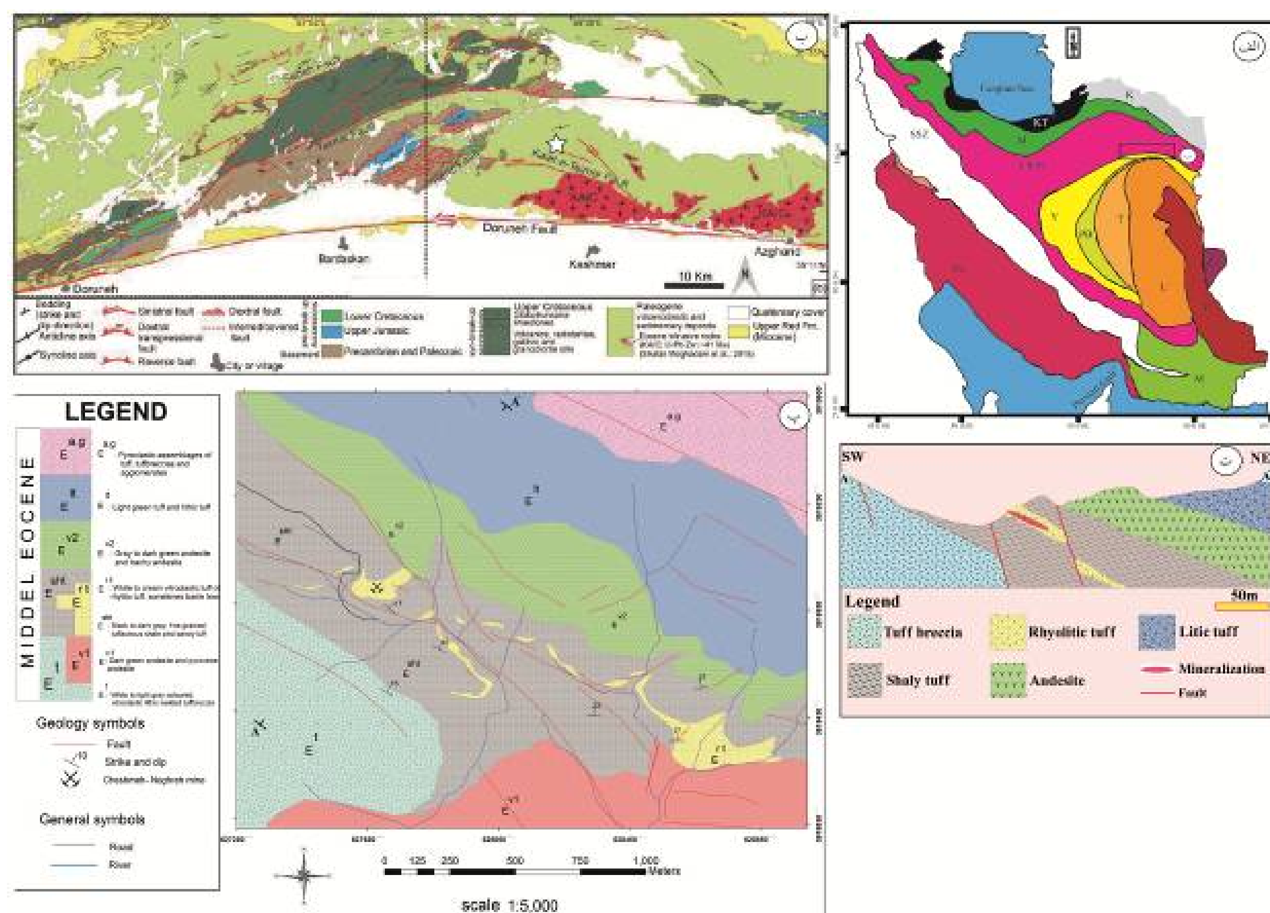
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۵۱۷۸۲۱۵، نمابر: ۰۲۱۸۸۲۲۴۷۶۰، پست الکترونیکی: h.tajeddin@modares.ac.ir

چینه‌سان معرفی‌گردیده است.

امروزه شیمی کانی‌های سولفیدی سولفوسالتی، به‌عنوان ابزاری برای تعیین شرایط زمین شیمیایی و حتی دمای نهشت کانه‌ها، استفاده می‌شود [۱۳-۱۶]؛ در این پژوهش، شرایط زمین‌شیمیایی سامانه کانه‌زایی و نیز الگوی فراوانی و پراکندگی برخی عناصر فلزی در فازهای مختلف کانیایی بر پایه ترکیب شیمیایی کانی‌ها، بررسی شده است.

زمین‌شناسی و کانه‌زایی

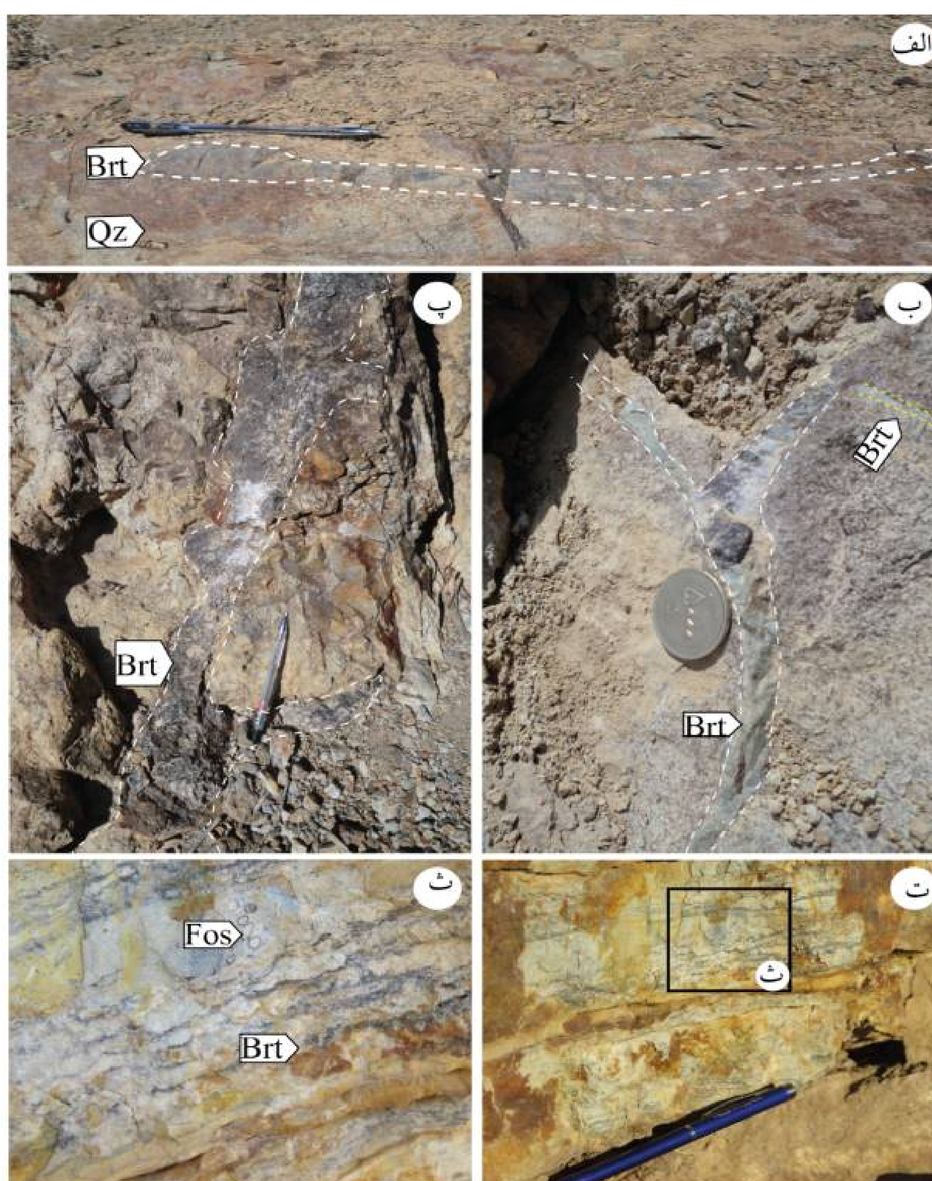
کانسار چشمه نقره در کرانه شمالی پهنه ساختاری ایران مرکزی، در جنوب زیرپهنه سبزوار و مرز بین گسل درونه و گسل تکنار و در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشمر قرار دارد [۱۷-۱۹] که در یک محیط کششی درون قوسی تشکیل شده است [۱۲،۱۱]. توالی چینه‌شناسی در منطقه کانسار چشمه نقره شامل واحدهای آتش‌فشانی-رسوبی ائوسن است که از قدیم به جدید عبارت‌اند از ۱) واحد توف برش بارنگ سفید تا خاکستری روشن، ۲) واحد آندزی بازالت بارنگ سبز تیره، ۳) واحد شیل توفی و ماسه توفی خاکستری رنگ؛ ۴) واحد توف ریولیتی سفید تا کرم رنگ، ۵) واحد آندزیت و تراکی آندزیت خاکستری تا سبز تیره، ۶) واحد توف و توف سنگی سبز روشن و ۷) مجموعه آذرآواری توف، توف برش و آگلومرا (شکل‌های ۱ پ و ت).



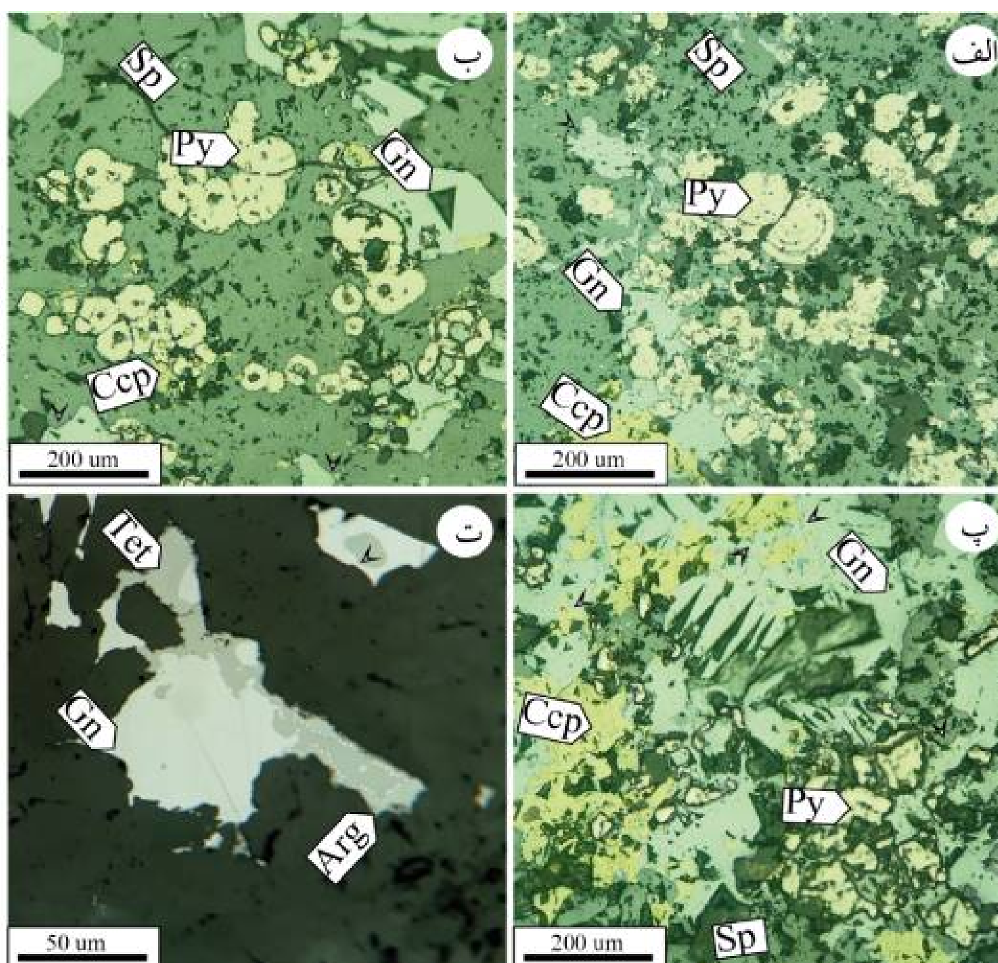
شکل ۱ الف) نقشه زمین‌شناسی ساختاری ایران [۱۹،۱۸]. ب) نقشه زمین‌شناسی زیرپهنه سبزوار. پ) نقشه زمین‌شناسی کانسار چشمه نقره. ت) مقطع عرضی کانسار چشمه نقره که موقعیت آن با علامت ستاره نقشه زمین‌شناسی تصاویر الف و ب نشان داده‌شده است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.9.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.119]

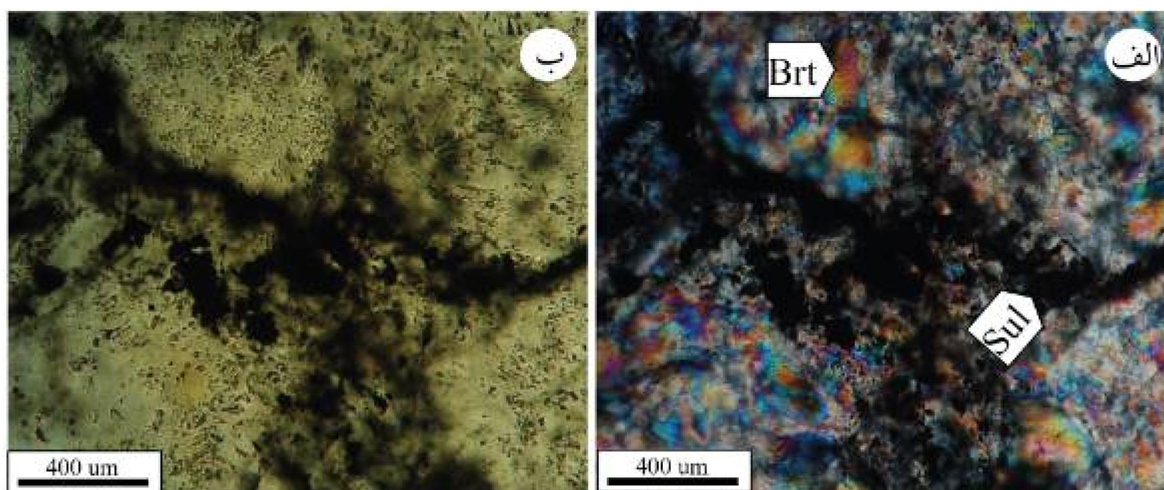
کانه‌زایی در کانسار چشمه نقره به‌صورت عدسی‌های باریتی- سیلیسی (شکل ۲ الف) با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق و شیب ۱۷ درجه به سمت شمال شرق، درون واحد توف ریولیتی سفید تا کرم رنگ رخداده است (شکل ۱ پ). عدسی-های باریتی در مقیاس نمونه دستی ساخت نواری (شامل نوارهای باریت و توف) و توده‌ای دارند (شکل‌های ۲ ب تا ت) و بر پهنه رگه- رگچه‌ای قرار دارند (شکل ۲ ب). کانسنگ‌های باریتی با مقادیری از کوارتز همراه بوده و اغلب دارای کانه‌های فلزی پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، تترائدریت، آرژانتیت و الکتروم هستند (شکل ۳). کانی‌های سولفید و سولفوسالتی فلزهای پایه (Cu, Pb, Zn) و گران‌بها (Au, Ag) به‌صورت رگچه‌های سولفیدی (شکل ۴) و دانه‌پراکنده درون عدسی‌های باریتی پراکنده هستند (شکل ۵). بر اساس بررسی-های میکروسکوپی، به ترتیب کانی‌های پیریت، کالکوپیریت، گالن، آرژانتیت، تترائدریت و اسفالریت تشکیل شده‌اند. توالی همبرزایی کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی در بخش چینه-سان این کانسار در شکل ۶ نشان داده‌شده است.



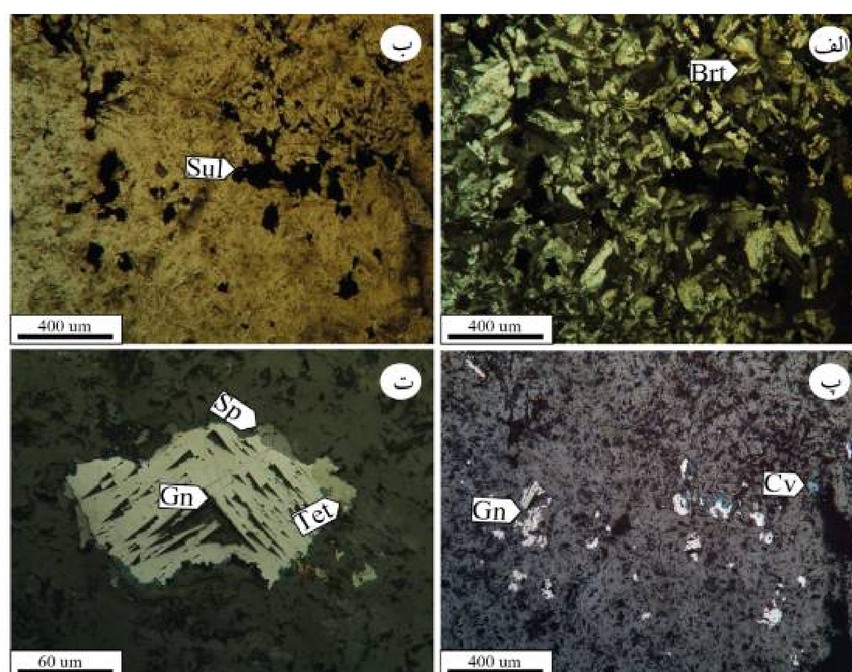
شکل ۲ الف) نمایی نزدیک از عدسی سیلیسی (Qz) دربردارنده یک عدسی باریتی (Brt). ب) تصویر صحرایی از رگه و لایه باریتی. پ) تصویر رگه باریتی که سنگ میزبان توفی را قطع کرده است. ت) نمایی از لایه‌های باریتی در سنگ میزبان توفی. ث) نمایی نزدیک از تصویر "ت" که در آن لایه باریتی همراه با سنگواره ها (Fos) دیده می‌شود.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی الف) کانی‌های پیریت گل کلمی، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت در کانسنگ سولفید توده ای، ب) جانشینی پیریت-های گل کلمی با گالن، پ) جانشینی کالکوپیریت با گالن و جانشینی کالکوپیریت و گالن با اسفالریت، ت) ارتباط بافتی کانی‌های گالن، تترائدریت و آرژانتیت در باریت. که تترائدریت در حال جانشینی به جای آرژانتیت است. خط چین سفید رنگ مرز تترائدریت-آرژانتیت و پیکان های سفید رنگ محل جانشین کانی‌ها نسبت به هم را نشان می دهند. تصاویر در نور بازتابی ثبت شدند. (Arg: آرژانتیت، Ccp: کالکوپیریت، Gn: گالن، Sp: اسفالریت و Py: پیریت).



شکل ۴ تصویر میکروسکوپی از رگچه سولفیدی (Sul) درون باریت (Brt): الف) در نور عبوری قطبیده متقاطع (XPL) و ب) در نور عبوری قطبیده صفحه ای (ppl)



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از کانه‌زایی سولفیدی به‌صورت دانه پراکنده در متن عدسی‌های باریتی: (الف، ب و پ) کانه‌های کدر سولفید در زمینه باریتی (به ترتیب نور عبوری XPL، ب) نور عبوری PPL در نور بازتابی.) در تصویر پ کانی‌های کدر، گالن و کوولیت هستند. ت) ارتباط بافتی گالن به همراه تترائدریت و اسفالریت در نور بازتابی.(Brt: باریت، Cv: کولیت، Gn: گالن، Sp: اسفالریت، Sul: سولفید و Tet: تترائدریت).

Minerals	Mineralization
Pyrite	
Chalcopyrite	
Galena	
Argentite	
Tetrahedrite	
Sphalerite	

شکل ۶ توالی همبرزایی کانی‌های سولفیدی و سولفوسالتی در بخش چینه‌سان کانسار چشمه نقره.

روش بررسی

برای بررسی شیمی کانه‌های موجود در بخش چینه‌سان کانسار چشمه نقره، تعداد ۸ مقطع نازک صیقلی از کانسار چشمه نقره انتخاب و با ریزپردازشگر الکترونی (EPMA) مدل Camera SX100 در مرکز تحقیقات و فراوری مواد معدنی ایران تجزیه و تصویربرداری شدند. برای این منظور، در مجموع ۴۱ نقطه در اسفالریت (۵ نقطه)، پیریت (۱۰ نقطه)، گالن (۷ نقطه)، کالکوپیریت (۵ نقطه)، تترائدریت (۸ نقطه)، آرژانتیت (۴ نقطه) و الکتروم (۲ نقطه) در شرایط اختلاف پتانسیل ۲۰ کیلوولت، شدت جریان ۲۰ نانو آمپر و قطر باریکه ۳ میکرومتر تجزیه شدند. حد آشکارسازی برای عناصر اصلی ۰/۰۵ درصد وزنی و برای عناصر فرعی ۰/۰۱ درصد وزنی بود. استانداردهای استفاده‌شده برای واسنجی عناصر روی، کادمیوم، نقره، آرسنیک، کبالت، منگنز و آنتیمون به ترتیب اسفالریت، گرینوکیت، هسیت، آرسنات گالیم، کبالت خالص، رودونیت و آنتیمونیت بودند. کانی کالکوپیریت به‌عنوان استاندارد برای هر دو عنصر آهن و مس بکار برده شد.

نتایج

از تجزیه ریزپردازش الکترونی (EPMA) بر روی کانی‌های گالن، اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت، تترائدریت، آرژانتیت و الکتروم موجود در بخش چینه‌سان کانسار چشمه نقره، نتایج زیر به دست آمد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.9.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.119]

اسفالریت: مقدار کبالت، مس، سلنیوم و طلا در این کانی کمتر از حد آشکارسازی دستگاه و مقدار روی در اسفالریت ۶۴٫۱ تا ۶۵٫۸۶ درصد (با میانگین ۶۴٫۷ و انحراف معیار ۰٫۶۸) درصد شده است. عناصر فرعی دوظرفیتی موجود در این کانی آهن و کادمیوم و عناصر فرعی شامل نقره، بیسموت و آنتیمون هستند (جدول ۱).

گالن: در این کانی، مقادیر کبالت و طلا پایین‌تر از حد آشکارسازی دستگاه است. مقدار سرب در گالن در گستره ۸۶٫۲۷ تا ۸۶٫۷۱ درصد (با میانگین ۸۶٫۴ و درصد انحراف معیار ۰٫۱۵) درصد اندازه‌گیری شده است. مس، نقره، بیسموت و آنتیمون، همراه با عناصر دوظرفیتی نیکل، روی، آهن و کادمیوم از عناصر موجود در این کانی هستند (جدول ۲).

کالکوپیریت: فراوانی عناصر کبالت، کادمیوم و طلا در کالکوپیریت کمتر از حد آشکارسازی دستگاه و مقدار مس در کالکوپیریت ۳۴٫۳۴ تا ۳۴٫۷۴ درصد (با میانگین ۳۴٫۴ درصد و انحراف معیار ۰٫۱۵) درصد است. نقره، بیسموت، سلنیوم و آنتیمون، همراه با عناصر فرعی دوظرفیتی روی، نیکل و سرب در کانی کالکوپیریت حضور دارند (جدول ۳).

پیریت: مقدار آهن در پیریت در گستره ۴۴٫۲۰ تا ۴۵٫۶۹ درصد (با میانگین ۴۵٫۱۷ درصد و انحراف معیار ۰٫۵۳) درصد اندازه‌گیری شده است. تجزیه پیریت‌های گل کلمی نشان می‌دهد که اگرچه فراوانی عناصر طلا، کادمیوم و کبالت پایین‌تر از حد آشکارسازی دستگاه است، ولی عناصر روی، سرب، مس و نقره، همراه با بیسموت، آنتیمون و نیکل در این نوع از پیریت‌ها حضور دارند (جدول ۴).

جدول ۱ مقادیر آماری داده های کانی اسفالریت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی)

عناصر	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi	FeS
N	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
متوسط	۰٫۶۲	۰٫۰۶	۳۳٫۰۷	۰	۰	۶۴٫۷	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۲	۰٫۲۹	۰٫۰۱	۰	۰	۰٫۱۱	۰٫۱۶	۱٫۱۱
انحراف معیار (S. D)	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۵۱	۰	۰	۰٫۶۸	۰٫۰۳	۰	۰٫۰۲	۰٫۲۰	۰٫۰۲	۰	۰	۰٫۱۰	۰٫۰۹	۰٫۱۲
کمینه	۰٫۵۳	۰٫۰۰	۳۲٫۴۴	۰	۰	۶۴٫۱۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۱۳	۰٫۰۰	۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۹۳
بیشینه	۰٫۷۰	۰٫۱۳	۳۳٫۷۸	۰	۰	۶۵٫۸۶	۰٫۰۷	۰	۰٫۰۵	۰٫۶۳	۰٫۰۵	۰	۰	۰٫۲۵	۰٫۲۷	۱٫۲

جدول ۲ مقادیر آماری داده های گالن کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
متوسط	۰٫۳۹	۰٫۱۸	۱۲٫۳	۰	۰٫۲۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰۴	۰٫۰۰۵	۰٫۰۳۱	۰٫۰۵	۰٫۰۲۷	۰٫۰۳۵	۰	۸۶٫۴۰	۰٫۴۲
انحراف معیار (S. D)	۰٫۱۱	۰٫۱۹	۰٫۳۲	۰	۰٫۱۸	۰٫۰۳	۰٫۰۰۷	۰٫۰۱۱	۰٫۰۵	۰٫۰۷	۰٫۰۳	۰٫۰۳۷	۰	۰٫۱۵	۰٫۰۹
کمینه	۰٫۲۹	۰٫۰۰	۱۲٫۰۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۸۶٫۲۷	۰٫۲۸
بیشینه	۰٫۵۷	۰٫۵۵	۱۲٫۸۸	۰	۰٫۵۱	۰٫۱۰	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۱۲	۰٫۱۹	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰	۸۶٫۷۱	۰٫۵۷

جدول ۳ مقادیر آماری داده ای کالکوپیریت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Elements	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	N	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
متوسط	Mean	۲۹٫۶۰	۰٫۰۱	۴۳٫۳۰	۰	۳۴٫۴۰	۰٫۱۱	۰٫۱۵	۰٫۰۲	۰٫۰۷	۰	۰٫۰۸	۰٫۰۰۸	۰	۰٫۲۹	۰٫۲۱
انحراف معیار (S. D)	S. D	۰٫۵۹	۰٫۰۲	۰٫۵۵	۰	۰٫۱۵	۰٫۲۰	۰٫۱۰	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰	۰٫۱۸	۰٫۰۰۸	۰	۰٫۲۶	۰٫۱۰
کمینه	Min	۲۸٫۸۳	۰٫۰۰	۳۳٫۴۱	۰	۳۴٫۳۴	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۰۷	۰٫۱۰
بیشینه	Max	۳۰٫۴۵	۰٫۰۶	۳۴٫۸۵	۰	۳۴٫۷۴	۰٫۴۶	۰٫۲۴	۰٫۰۹	۰٫۲۳	۰	۰٫۴۲	۰٫۰۲	۰	۰٫۶۱	۰٫۳۶

جدول ۴ مقادیر آماری داده‌های کانی پیریت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Elements	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	N	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
متوسط	Mean	۴۵٫۱۷	۰٫۲۲	۵۲٫۶	۰	۰٫۴۳	۰٫۲۳	۰٫۳۰	۰٫۰۱	۰٫۲۱	۰	۰٫۱۸	۰٫۰۱	۰	۰٫۴۳	۰٫۱۹
انحراف معیار (S. D)	Std. D	۰٫۵۳	۰٫۳۱	۰٫۵۶	۰	۰٫۲۹	۰٫۲۸	۰٫۱۸	۰٫۰۲	۰٫۱۹	۰	۰٫۲۰	۰٫۰۱	۰	۰٫۲۹	۰٫۰۹
کمینه	Min	۴۴٫۲۰	۰٫۰۰	۵۲٫۱۱	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۷	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰	۰٫۱۵	۰٫۰۵
بیشینه	Max	۴۵٫۶۹	۰٫۸۵	۵۳٫۸۸	۰	۰٫۹۸	۰٫۷۸	۰٫۷۳	۰٫۰۸	۰.۰٫۴۹	۰	۰٫۶۶	۰٫۰۴	۰	۰٫۹۴	۰٫۳۲

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.9.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.119]

تترائدریت-تنانتیت: مقدار نقره در تترائدریت-تنانتیت در گستره ۹٫۷۹ تا ۱۵٫۲۳درصد (با میانگین ۱۲٫۵ درصد و انحراف معیار ۱٫۸۹ درصد)، آنیتمون ۱۶٫۰۹ تا ۲۱٫۰۸ درصد (با میانگین ۱۸٫۱ درصد و انحراف معیار ۱٫۸۳ درصد) و آرسنیک در گستره ۴٫۶۳ تا ۸٫۲۹ درصد (با میانگین ۶٫۵۴ درصد و انحراف معیار ۱٫۴۷ درصد) اندازه‌گیری شده است. فراوانی تلوئور، طلا و کبالت در تترائدریت کمتر از حد آشکارسازی دستگاه است. کادمیوم، سرب، بیسموت، آهن، روی و نیکل از عناصر فرعی این کانی هستند. مقدار نقره در این کانه بالاست (جدول ۵).

آرژانتیت: مقدار نقره در آرژانتیت در گستره ۶۴٫۱۸ تا ۸۶٫۴۰ درصد (با میانگین ۱۲٫۵ درصد و انحراف معیار ۱٫۸۹ درصد) اندازه‌گیری شده است. فراوانی عناصر طلا و کبالت در آرژانتیت کمتر از حد آشکارسازی دستگاه است. عناصر آهن، نیکل، مس، آنتیمون و بیسموت در این کانی به‌عنوان عناصر فرعی و سیلنیوم و آرسنیک از دیگر عناصر موجود در این کانی هستند (جدول ۶).

الکتروم: مقدار طلا و نقره در الکتروم به ترتیب ۷۶٫۶۱ تا ۷۹٫۱۲ و ۱۷٫۶۱ تا ۱۸٫۸۱ درصد اندازه‌گیری شده است. مقدار عناصر دیگر در نمونه مورد بررسی در جدول ۷ آورده شده است.

بحث

اسفالریت: عناصر دوظرفیتی چون کادمیوم، سرب، آهن و نیکل به‌صورت جانشینی درون ساختار اسفالریت وارد شده‌اند [۱۳]. حضور عناصر بیسموت و نقره در اسفالریت نیز نشان‌دهنده جانشینی آنها به‌جای Zn طی واکنش زیر است [۱۳]:



$$Zn^{2+} \leftrightarrow Ag^{+} + Bi^{3+} \quad (1)$$

مقدار آهن درون اسفالریت مشخصه شرایط ترمودینامیکی تشکیل کانسار است [۲۰]. بالا بودن گریزندگی اکسیژن و کم بودن دما در کانسارهایی که به‌صورت گرمابی در زیر دریا تشکیل‌شده‌اند، موجب پایین آمدن مقدار آهن درون اسفالریت می‌شود [۲۱]. مرحله اصلی کانی‌سازی به‌صورت نهشت باریت توده‌ای و لایه‌ای همراه با سیلیسی شدن در بخش چینه‌سان کانسار چشمه نقره رخ‌داده است؛ در همراهی با باریت و سیلیس، کانه‌های سولفیدی فلزهای پایه به‌صورت دانه‌پراکنده دیده می‌شوند که بیانگر نهشت کانه‌ها در یک محیط زیراکسیدی است [۲۱،۲۲]. مقدار آهن و درصد مولی FeS موجود در اسفالریت‌های کانسار چشمه نقره نسبت به سایر کانسارهای تشکیل‌شده در زیر دریا پایین است. [۲۰] بر اساس نسبت Fe/Zn در اسفالریت (در گستره ۰٫۰۰۸ تا ۰٫۰۱)، دمای تشکیل اسفالریت‌های موجود در کانسنگ‌های طلادار چشمه نقره حدود ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است که نهشت اسفالریت در یک محیط زیراکسیدی، کم آهن (Fe<1 wt%) و با گریزندگی اکسیژن بالا را نشان می‌دهد.

جدول ۵ مقادیر آماری داده‌های کانی تترائدریت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Elements	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	N	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
متوسط	Mean	۲٫۰۵	۰٫۱۸	۲۴٫۸۰	۰	۳۱٫۰۰	۳٫۹۰	۶٫۵۴	۰٫۰۵	۱۲٫۵۰	۰٫۲۰	۱۸٫۱۰	۰	۰	۰٫۲۵	۰٫۰۸
انحراف معیار (S. D)	S. D	۰٫۲۸	۰٫۱۲	۰٫۷۰	۰	۱٫۱۹	۱٫۰۲	۱٫۴۷	۰٫۰۲	۱٫۸۹	۰٫۰۸۴	۱٫۸۳	۰	۰	۰٫۲۷۳	۰٫۰۷
کمینه	Min	۱٫۶۹	۰٫۰۰	۲۳٫۴۴	۰	۲۸٫۹۴	۲٫۵۳	۴٫۶۳	۰٫۰۱	۹٫۷۹	۰٫۰۷	۱۶٫۰۹	۰	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
بیشینه	Max	۲٫۳۸	۰٫۳۴	۲۵٫۷۱	۰	۳۲٫۷۲	۵٫۵۸	۸٫۲۹	۰٫۰۷	۱۵٫۲۳	۰٫۳۱	۲۱٫۰۸	۰	۰	۰٫۸۸	۰٫۲۵

جدول ۶ مقادیر آماری داده‌های کانی آرژانتیت کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Elements	Fe	Ni	S	Co	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Te	Au	Pb	Bi
N	N	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
متوسط	Mean	۰٫۱۸	۰٫۲۰	۱۲٫۹۰	۰	۳٫۶۰	۰٫۰۱	۱٫۷۰	۰٫۰۲۲	۷۷٫۳۹	۰٫۸۸	۲٫۲۵	۰٫۰۸	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۵
انحراف معیار (S. D)	S. D	۰٫۰۵	۰٫۲۶	۲٫۴۰	۰	۴٫۲۰	۰٫۰۲	۱٫۴۰	۰٫۰۱	۹٫۴۰	۰٫۰۸	۱٫۷۰	۰٫۰۴	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۵
کمینه	Min	۰٫۱۴	۰٫۰۰	۱۰٫۹۶	۰	۰٫۱۰	۰٫۰۰	۰٫۴۴	۰٫۰۰	۶۴٫۱۸	۰٫۷۸	۰٫۵۴	۰٫۰۵	۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
بیشینه	Max	۰٫۲۴	۰٫۵۶	۱۶٫۵۴	۰	۹٫۶۶	۰٫۰۴	۳٫۶۴	۰٫۰۴	۸۶٫۴۰	۰٫۹۸	۴٫۶۸	۰٫۱۳	۰	۰٫۰۲	۰٫۱۲

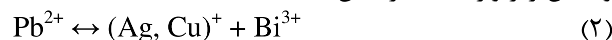
جدول ۷ مقادیر آماری داده های الکتروم کانسار چشمه نقره (بر حسب درصد وزنی).

عناصر	Te	S	As	Bi	Fe	Cu	Ag	Au
El 1	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۲۶	۰٫۳۸	۰٫۱۵	۱۸٫۸۱	۷۹٫۱۲
El 2	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۰۷	۰٫۱۵	۰٫۱۶	۰٫۹۳	۱۷٫۶۱	۷۶٫۶۱

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.9.3]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.119]

نکته مهم دیگر در مورد اسفالریت‌های کانسار چشمه نقره دیده نشدن درونگیرهای کالکوپیریت، پیریت و پیروتیت است. تشکیل این کانی‌ها به‌صورت درونگیر وابسته به وجود عناصری چون مس و آهن درون ساختار اسفالریت است. با توجه به مقدار ناچیز آهن و مس درون اسفالریت، تشکیل نشدن این کانی‌ها به‌صورت درونگیر دور از انتظار نیست [۲۰]. نمودار Fe/Zn نسبت به S نشان می‌دهد که کانسار چشمه نقره مانند کانسارهای گرمابی تشکیل‌شده در زیر دریا چون (Sisters Peak) S°5، Volcano 19 و PACManus در یک محیط کم رسوب (Sediment-starved) تشکیل‌شده است (شکل ۷) [۲۰].

گالن: حضور آهن درون کانی گالن نشان‌دهنده جانشینی آهن و یا حضور ذرات بسیار ریز پیریت در گالن‌های کانسار چشمه نقره است. وجود کادمیوم و روی در کانی گالن نیز می‌تواند با ذرات ریز اسفالریت در گالن مربوط باشد [۱۴]. بیسموت، نقره و مس نیز به‌صورت جانشینی جفتی به‌جای سرب براساس واکنش زیر وارد ساختار گالن شده‌اند [۱۴]:



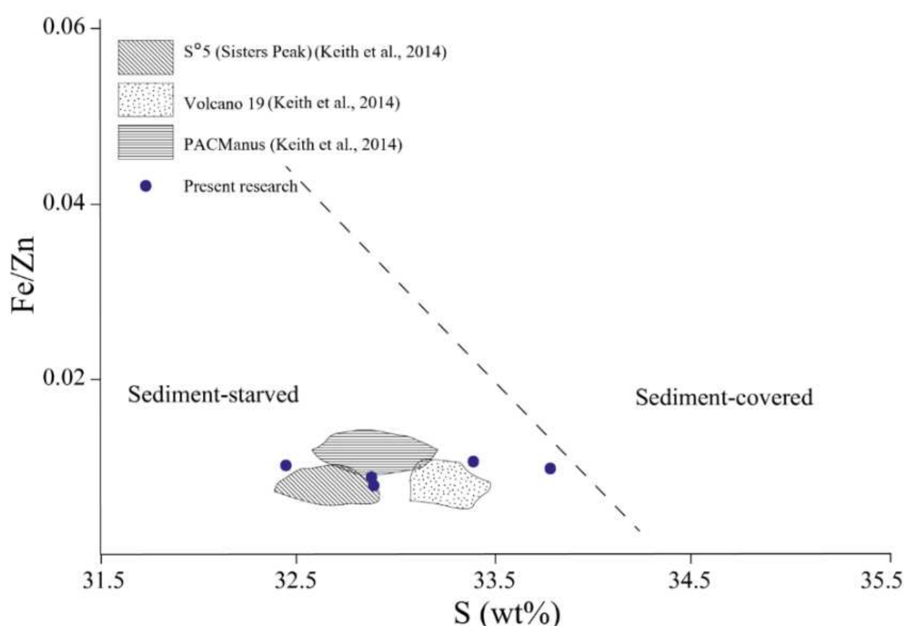
$$Pb^{2+} \leftrightarrow (Ag, Cu)^{+} + Bi^{3+} \qquad (۲)$$

کالکوپیریت: کالکوپیریت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کانی‌های سولفیدی مس، می‌تواند میزبان عناصر مهمی باشد. حضور کاتیون‌های دوظرفیتی سرب و روی در کالکوپیریت‌های کانسار چشمه نقره، جانشینی سرب و روی در ساختار این کانی و یا حضور اسفالریت و گالن‌های بسیار ریز در کالکوپیریت را نشان می‌دهد [۱۶]. وجود عنصر سلنیوم در کالکوپیریت نیز نشان‌دهنده جانشینی سلنیوم به‌جای گوگرد است [۱۶].

بیسموت، آنتیمون و نقره از دیگر عناصر مهم در کالکوپیریت‌ها هستند؛ عناصر بیسموت و آنتیمون به احتمال بسیار با جانشینی به‌جای Cu^{2+} وارد ساختار کالکوپیریت شده‌اند. نقره به‌صورت Ag^{+} می‌تواند در بخش‌های چار وجهی ساختار کالکوپیریت جانشین Cu^{+} شود [۱۶]. گفتنی است که در کانسار چشمه نقره، باوجود کانی‌های سولفیدی فلزهای پایه که همراه با کالکوپیریت در یک مرحله متبلور شده‌اند، کالکوپیریت نیز میزبان عناصر فرعی و گران‌بها چون نقره است.

پیریت

پیریت کانی رایج سولفید آهن در محیط‌های مختلف است. در کانسار چشمه نقره، پیریت اغلب بافت گل کلمی نشان می‌دهد و در بعضی بخش‌ها در حال جانشین شدن با سایر کانی‌های سولفیدی چون گالن و اسفالریت است (شکل ۳ الف). آرسنیک شاید مهم‌ترین عنصر موجود در ساختار کانی پیریت باشد. جانشینی آرسنیک در ساختار پیریت به دو صورت جانشینی As به‌جای گوگرد [۲۳،۲۴] و جانشینی آرسنیک به‌جای آهن [۲۳، ۲۵،۲۶] ممکن است. در شرایط احیایی، آرسنیک جانشین گوگرد و در شرایط اکسایشی جانشین آهن می‌شود [۲۵]. حضور عناصر سنگین چون نقره و سرب در پیریت نشان‌دهنده تشکیل پیریت‌ها در شرایط اکسایشی است [۲۵].



شکل ۷ نمودار درصد وزنی گوگرد نسبت به Fe/Zn در اسفالریت [۲۰]. که براساس آن، اسفالریت‌های موجود در کانسار چشمه نقره شبیه اسفالریت‌های تشکیل‌شده در کانسارهای درون حوضه کم رسوب هستند. بر این اساس، دمای تشکیل اسفالریت‌های کانسار چشمه نقره حدود ۲۳۵ درجه سانتیگراد است.

بررسی شیمی پیریت‌های نهشته شده از سیال‌های گرمابی نشان می‌دهد که عناصر فلزی ازجمله روی، مس و نیکل جانشین آهن موجود در پیریت شده‌اند [۲۳]. از سوی دیگر، بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی و تصاویر الکترون‌های پس پراکنده (BSE) می‌توان گفت که مقادیر بالای سرب، روی و مس در کانی پیریت می‌تواند ناشی از حضور میانبارهایی از کانی‌های گالن، اسفالریت و کالکوپیریت باشد.

تترائدریت-تنانتیت: بر اساس نتایج تجزیه ریزپردازش الکترونی مایکروپروب (EPMA)، تترائدریت-تنانتیت تنها کانی سولفوسالتی دیده‌شده در کانسنگ‌های چینه‌سان است. به‌جز Fe و Zn که از عناصر رایج در کانی تترائدریت-تنانتیت هستند، گاهی عناصر دیگر نیز در این کانی دیده می‌شود در کانسارهایی که کانی‌های سولفیدی فلزهای پایه همراه با تترائدریت-تنانتیت تشکیل‌شده‌اند، عناصر آرسنیک، آنتیمون و نقره کانی تترائدریت-تنانتیت را به‌عنوان میزبان اصلی انتخاب می‌کرده و وارد ساختار تترائدریت-تنانتیت می‌شوند [۱۵]. اغلب مقدار مس و آهن درون اسفالریتی که همراه با تترائدریت-تنانتیت تشکیل‌شده کمتر از تترائدریت است [۱۵]. گالن اغلب میزبان مناسب‌تری نسبت به تترائدریت-تنانتیت برای عنصر بیسموت است [۱۵].

آرژانتیت: کانی آرژانتیت در کانسار چشمه نقره در همراهی با تترائدریت-تنانتیت تشکیل‌شده و مقادیر به نسبت قابل‌توجهی از عناصر مس، آنتیمون، آرسنیک، کادمیوم، نیکل و آهن را داراست که می‌تواند بیانگر حضور درونگیرهایی از کانی تترائدریت-تنانتیت در آرژانتیت باشد. سلنیوم و تلوریوم موجود در کانی آرژانیتیت، به احتمال بسیار جانشین گوگرد کانی میزبان شده‌اند.

برداشت

کانسار Ba-Au-Ag چشمه نقره از جمله کانسارهای آتشفشانزاد نوع کروکوی غنی از باریت بوده که در یک محیط کششی درون قوسی تشکیل‌شده است. عدسی‌های باریتی سولفیددار کانسار که حجم اصلی ذخیره را تشکیل می‌دهند، در واحد توف ریولیتی و بر رگه-رگچه‌های باریتی- سیلیسی تشکیل شده‌اند. این رگه-رگچه‌ها تغذیه کننده عدسی‌های باریتی هستند. تشکیل عدسی‌های باریت به همراه سولفیدهای دانه‌پراکنده نشان می‌دهد که این کانسار در یک محیط زمین شیمیایی زیراکسیدی شکل گرفته است.

مقدار آهن درون اسفالریت کانسار چشمه نقره پایین بوده (Fe<1 wt%) و بر این اساس، دمای کانه‌زایی حدود ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. تشکیل کانه‌زایی در یک محیط زیراکسیدی همراه با باریت نشان می‌دهد که این کانه-زایی در شرایط با گریزندگی اکسیژن بالا رخداده و بالا بودن اکسیژن محیط از عوامل موثر در کم بودن آهن درون اسفالریت است. از سوی دیگر، براساس مقادیر روی، آهن و گوگرد اسفالریت، کانسارچشمه نقره مانند کانسار های گرمابی در یک محیط کم رسوب تشکیل‌شده است.

کانی گالن در کانسار چشمه نقره میزبان عناصر مهمی چون بیسموت، نقره و مس بوده است که به احتمال بسیار به‌صورت جانشینی به جای سرب وارد ساختار گالن شده‌اند. همچنین عناصر بیسموت، آنتیمون و نقره جانشین مس موجود در ساختار کالکوپیریت شدند. نقره به‌صورت Ag^+ در بخش‌های چاروجهی ساختار کالکوپیریت جانشین Cu^+ گردیده است. پیریت‌های موجود در کانسار چشمه نقره عناصر سنگین چون نقره و سرب هستند که این با تشکیل پیریت‌ها در یک محیط زیراکسیدی همخوانی دارد.

مراجع

[1] Qaemmaghami nejad A., Malehzadeh Shafaroodi A., Karimpour M.H., "*Mineralogy, geochemistry, and fluid inclusion studies of Kuh-Sorbi Barite-lead ± copper deposit, northeast of Iran*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 23 (2) 225-240 (in Persian).

[2] Hajalilo B., Vosough B., Moayed M., "*REE Geochemistry of Precambrian Shale-Hosted Barite-Galena Mineralization, a Case Study from NW Iran*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 22 (2) (2014) 39-48 (in Persian).

[3] Pourkaseb H., Zarasvandi A. R., Aliabadi M.A., "*Geochemistry and genesis of Robat-Paein barite deposit, Khomein, Markazi province*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 24 (4) (2017) 813-824 (in Persian).

[4] Yarmohammadi A., Rastad E., Mohajjel M., Shamsa M.J., "*Barika gold occurrence: gold- rich volcanogenic massive sulfide in Iran*", Tehran Uni. J. Sci. 34 (2008) 47–60 (in Persian).

[5] Yarmohammadi A., Rastad E., "*Deformation effects on the gold bihavior in Barika gold-rich massive sulfide deposit, east of Sardasht*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (3) (2008) 442-435 (in Persian).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.1.9.3]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.1.119]

tennantite: Effects on element partitioning among base metal sulphides", Minerals, 7(2) (2017) 17.

[16] George L. L., Cook N. J., Crowe B. B., Ciobanu C. L. *"Trace elements in hydrothermal chalcopyrite",* Mineralogical Magazine, 82(1) (2018) 59-88.

[17] Alavi M., *"Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations*", Tectonophysics. 229 (1994) 211–238.

[18] Taheri J., Shamanian G. H., *"Geological map in 1:100000 scale of Kashmar sheet"*, Geological Survey of Iran (2001).

[19] Shahrabi M., Hosseini M., Shabani G., *"Geological map in 1:100000 scale of Bardeskan sheet*", Geological Survey of Iran (2006).

[20] Keith M., Haase K. M., Schwarz-Schampera U., Klemd R., Petersen S., Bach W., *"Effects of temperature, sulfur, and oxygen fugacity on the composition of sphalerite from submarine hydrothermal vents*", Geology, 42(8), 699-702.

[21] Koski R. A., Hein J. R., *"Stratiform barite deposits in the Roberts Mountains allochthon, Nevada: A review of potential analogs in modern sea-floor environments: US Department of the Interior*", US Geological Survey (2004).

[22] Maynard J., Morton J., Valdes-Nodarse E., Diaz-Carmona A., *"Sr isotopes of bedded barites; guide to distinguishing basins with Pb-Zn mineralization*", Economic Geology, 90(7) (1995) 2058-2064.

[23] Gregory, D. D., Large, R. R., Halpin, J. A., Baturina E. L., Lyons T. W., Wu S., *"Maslennikov*", Trace element content of sedimentary pyrite in black shales. Economic Geology, 110(6) (2015) 1389-1410.

[24] Reich M., Becker U., *"First-principles calculations of the thermodynamic mixing properties of arsenic incorporation into pyrite and marcasite*", Chemical Geology, 225(3) (2006) 278-290.

[25] Deditius A. P., Utsunomiya S., Renock D., Ewing R. C., Ramana C. V., Becker U., Kesler S. E., *"A proposed new type of arsenian pyrite: Composition, nanostructure and geological significance*", Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(12) (2008) 2919-2933.

[26] Qian G., Brugger J., Testemale D., Skinner W., Pring A., *"Formation of As (II)-pyrite during experimental replacement of magnetite under hydrothermal conditions*", Geochimica et Cosmochimica Acta, 100 (2013) 1-10.

[6] Tajeddin H.A., Rastad E., Yaghubpour A., Mohajjel M., *"Formation and evolution stages of gold rich Barika massive sulfide deposit, east of Sardasht, northern Sanandaj-Sirjan zone: Based on structural, textural and fluid inclusion studies"*, Iranian Journal of Economic Geology. 2(1) (2010) 107-135 (in Persian).

[7] Baharvandi A., Loutfi M., Ghaderi M., Jafari M., Tajeddin H. A., *"Ore mineralization and fluid inclusion and sulfur isotope studies of the Shekarbeig deposit, southwest Mahabad, Sanandaj–Sirjan Zone*", Quarterly Journal of Geosciences, Geol. Min. Expl. Surv. Iran. 26(103), (2017) 201-218 (in Persian).

[8] Tajeddin H. A., Hassankhanlou S., Mohajjel M., *"Geology, mineralogy and fluid inclusion studies of the Abdossamadi barite deposit, Northeast Marivan",* Quarterly Journal of Geosciences, Geol. Min. Expl. Surv. Iran. 27(109), 97-108 (2018) (in Persian).

[9] Hassankhanlou S., *"Geology, mineralogy, deformation and genesis of Abdolsamadi barite deposit in late Cretaceous volcano-sedimentary sequences",* NE Marivan. Unpublished M.Sc. thesis, Tehran, Tarbiat-Modares University, Iran.

[10] Richard P.J. Sholeh A., *"The Tethyan Tectonic History and Cu-Au Metallogeny of Iran, SEG Special Publication 19*", Economic Geology

[11] Qafouri E., Tajeddin H. A., Rastad E., *"Cheshmeh Noghreh gold deposit, NW Kashmar: an example of stratiform gold deposit in the Eocene volcano-sedimentary sequences*", 36th Symposium on Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran, 25-27 Feb. in Persian with English abstract (2018).

[12] Qafouri E., *"Geology, mineralogy, geochemistry and genesis of Cheshme Noghreh gold deposit, NW Kashmar",* Unpublished M.Sc. thesis, Tehran, Tarbiat-Modares University, Iran.

[13] Cook N. J., Ciobanu C. L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Melcher F., *"Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study",* Geochimica et Cosmochimica Acta, 73(16) (2009) 4761-4791.

[14] George L., Cook N. J., Ciobanu C. L., Wade B. P., *"Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study,* American Mineralogist, 100(2-3) (2015) 548-569.

[15] George L. L., Cook N. J., Ciobanu C. L., *"Minor and trace elements in natural tetrahedrite-*